

SIMULASI PERJALANAN AMPLOP BERKAS AKSELERATOR ION ENERGI MEDIUM

Sigit Hariyanto, Slamet Santosa

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju – BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281

ABSTRAK

SIMULASI PERJALANAN AMPLOP BERKAS AKSELERATOR ION ENERGI MEDIUM. Telah dilakukan simulasi transpor berkas ion energi menengah (tandem) dengan program partikel berkas optik laboratory versi 1.1.1. Berkas ion yang dipercepat adalah ion hidrogen dan nitrogen, ke luar dari sumber ion SNICS dengan inisial jejari ke arah X dan Y masing-masing 1 cm dan sudut emitansi ke arah horisontal dan vertikal masing-masing $16,4 \pi \text{ mm mRad}$. Simulasi dilakukan dua kali yaitu pada pemercepat energi rendah untuk ion negatif dan pada pemercepat energi menengah untuk ion positif. Untuk membatasi jejari amplop berkas pada hasil simulasi energi rendah digunakan program fitting dengan empat buah lensa einzel, dua buah magnet pembelok dan sebuah kuadropol elektrostatis. Untuk lensa einzel pertama diperoleh panjang fokus 70 cm, medan magnet pembelok 3,378 kG, sudut pembelokan 30° , Untuk lensa einzel kedua diperoleh panjang fokus 24 cm, pembelokan beam dengan sudut 90° , diperoleh medan magnet pembelok 3,89 kG dan diperoleh jejari kelengkungan 0,457 m. Setelah keluar, masuk lensa einzel dengan panjang fokus 30cm dan difokuskan oleh kuadropol listrik dengan koefisien kuadropol 54,25 dan -89,51 dan panjang elektroda 0,07m. Sebelum masuk ke tabung pemercepat, dilewatkan lensa einzel dengan panjang fokus 26 cm. Untuk mempercepat ion positif pada simulasi transport berkas pada energi medium digunakan tabung akselerator dengan tegangan pemercepat -15 MV, kemudian berkas elektron dilewatkan pada magnet pembelok dan magnet kuadropol. Traspor berkas dengan metode fitting mendapatkan pembelok magnet 15° dan kuat medan magnet 3,997 kG. Sedangkan pada panjang elektrode kuadropol magnet doublet 0,14 m didapatkan kuat medan magnet 3,2 kG dan -3,4 kG.

ABSTRACT

SIMULATION OF BEAM ENVELOP TRANSPORT IN MEDIUM ENERGY OF ION ACCELERATOR. Simulation of beam envelop transport in medium energy of ion accelerator (Tandem) using beam particle optic laboratory program of version 1.1.1 has been carried out. The accelerated ion beam are hydrogen and nitrogen ion, which leave the SNICS ion source within X and Y direction of initial radius of 1 cm respectively and having vertical and horizontal degree of emittance of $16,4 \pi \text{ mm mRad}$ respectively. The simulation is completed twice, i.e. for negative ion is made on low energy of accelerator and for positive ion is arranged on medium energy of accelerator. To keep the beam envelop radius of simulation result of low energy simulation, the fitting program is used with four einzel lenses, two bending magnet and one electrostatic quadrupole. On the first einzel lens the obtained focus length is 70 cm, the bending magnetic field as 3.378 kG, the angle of bending as 30° and the curvature radius as 0.533 m. On the second einzel lens the obtained focus length is 24 cm with bending beam angle as 90° , the bending magnetic field obtained as 3.89 kG and the obtained curvature radius is 0.457 m. The beam envelop is then entered into einzel lens with focus length of 30 cm and it then focused by using electrostatic quadrupole with coefficient quadrupole 54.25 and -89.51 and electrode length of 0.07 m. Before the beam envelop entered accelerator tube, it pass the einzel lens with focus length of 26 cm. To accelerate positive ion of the beam envelop simulation at medium energy the -15MV voltage of accelerator tube is used, then the beam passes through a bending magnet and a magnetic quadrupole. Beam envelop transport by using fitting method obtained a bending magnet 15° and a magnetic field strength 3.997 kG. While at the electrode length of 0.14 m of quadrupole magnetic doublet, it was obtained the magnetic field strengths of 3.2 kG and -3.4 kG

PENDAHULUAN

Sampai sekarang P3TM masih merencanakan program instalasi laboratorium berbasis akselerator. Bagian pokok instalasi tersebut adalah akselerator energi medium (tandem) dengan tegangan pemercepat 1,5 MV, yang diharapkan dapat menyediakan berkas ion proton dengan energi medium, dan kualitas berkas cukup stabil untuk analisis suatu bahan dengan metode PIXE, RBS, NRA dan eksperimen di bidang fisika, kimia, kedokteran dan lingkungan^[1]. Untuk keperluan tersebut, diperlukan sistem perencanaan penempatan dan besarnya parameter transportasi berkas ion dari sumber ion ke pemercepat kemudian ke tempat target dimana

eksperimen dilakukan. Peralatan/komponen akselerator untuk transpor berkas dan penempatan perencanaan seperti lensa elektrostatik (lensa einzel), lensa pemokus baik elektrostatik maupun magnet, magnet pembelok atau defektor, tabung hanyut dan sebagainya. Perencanaan memerlukan perhitungan simulasi keadaan/kualitas berkas sepanjang perjalanan ion, sehingga dapat mencapai target di tempat eksperimen pada keadaan yang diinginkan tidak mengalami tumbukan dengan dinding peralatan sistem transportasi.

Dalam makalah ini dilaporkan hasil simulasi untuk berkas ion H^+ dan N^+ yang dipercepat 1,5 MV dari sumber ion negatif dan percepatan awal 25 kV. Pada akselerator tandem 1,5 M, energi ion yang dihasilkan H^+ mencapai 3 MeV, tetapi untuk jenis ion dengan *charge state* lebih tinggi, energi yang dihasilkan lebih besar. Untuk simulasi transportasi berkas dipisah menjadi dua bagian yaitu pada percepatan energi rendah dan energi medium. Pada energi rendah simulasi dilakukan mulai dari sumber ion, pembelok, pemercepat sampai ke *stripper* dengan mempercepat ion negatif. Sedangkan pada bagian selanjutnya dilakukan simulasi dari sistem *stripper*, pemercepat energi medium, pembelok sampai ke target dengan mempercepat ion positif. Simulasi ini digunakan model tata letak akselerator tandem dari perusahaan NEC (*National Electrostatic Corporation*). Program yang digunakan dalam simulasi perjalanan amplop berkas akselerator ion menggunakan program PBO (*Particle Beam Optics*) version 1.1.1. untuk Microsoft windows 95/98 yang menggunakan kode tentang peralatan akselerator antara lain; lensa einzel, sistem pemokus elektrostatik/magnet, pembelok, pemercepat dan lainnya.

DASAR TEORI

Suatu berkas partikel yang bergerak dalam garis transportasi berkas melalui sistem statis maupun sistem medan magnet maupun elektrostatik dapat disederhanakan dengan proses perkalian matriks.

$$X(1) = R X(0) \quad (1)$$

Subskrip 0 dan 1 menunjukkan masuk dan keluarnya berkas ke masing-masing peralatan atau komponen sistem akselerator. R adalah matriks pengiriman (matrix R) dengan elemen 6×6 untuk orde pertama, merupakan persamaan gerak partikel yang melalui peralatan atau komponen akselerator. Beberapa komponen akselerator yang digunakan untuk eksperimen antara lain: tabung hanyut, lensa lensa pemokus, pembelok magnet, kuadropol magnet dan sebagainya. Secara umum matriks R untuk semua komponen akselerator merupakan perkalian masing-masing matriks^[2]:

$$R_{total} = R(n) \dots R(3) R(2) R(1) \quad (2)$$

Dengan $R(n) \dots R(3) R(2) R(1)$ = matriks pengirim dari komponen akselerator antara lain : lensa einzel, sistem pemokus, pemercepat, magnet pembelok dan sebagainya.

Berkas partikel dalam garis perjalanan kalau diproyeksikan ke bidang horisontal maupun vertikal berbentuk elips dengan arah yang berbeda. Teorema Liouville sangat berguna untuk menggambarkan berkas dalam ruang fase. Bila kita tahu luas yang diduduki oleh partikel-partikel dalam ruang fase pada awal dari garis peralanan berkas, maka kita dapat menentukan lokasi dan distribusi berkas pada tiap tempat yang lain sepanjang garis perjalanan, tanpa harus menghitung *trayektory* dari masing-masing partikel. Elips yang membatasi semua partikel dari berkas dalam ruang fase disebut elips fase.

Persamaan elips dalam dimensi n dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut^[2,3]:

$$X(0)^T \sigma^{-1} X(0) = 1 \quad (3)$$

Dengan $X(0)^T$ adalah *transpose* dari koordinat vektor matriks kolom berkas $X(0)$ dan $\sigma(0)$ matriks simetri merupakan bilangan nyata positif, kalau dituliskan dalam 2 dimensi (x, x') arah horizontal matriks σ :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} \text{ inversnya } \sigma^{-1} = 1/\varepsilon_x^2 \begin{bmatrix} \sigma_{22} & \sigma_{21} \\ \sigma_{21} & \sigma_{11} \end{bmatrix}$$

dengan ε_x^2 = determinan σ
matriks kolom berkas :

$$X = \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad X^T = \{ x \cdots x' \}$$

Penjabaran persamaan matriks $X^T \sigma^{-1} X = 1$ adalah bentuk persamaan elips :

$$\sigma_{22} X^2 - 2\sigma_{21} X' + \sigma_{11} X'^2 = \varepsilon_x^2 = \det \sigma \quad (4)$$

Luas elips adalah :

$$A = \pi \varepsilon_x = \pi (\det \sigma)^{1/2} = \pi X_{\text{mak}} X'_{\text{int}} = \pi X_{\text{int}} X'_{\text{mak}}, \quad \varepsilon_x = \text{emitansi}$$

Elips fase pada bidang (X, X') ditunjukkan pada Gambar 1, dengan masing-masing elemen matriks σ .

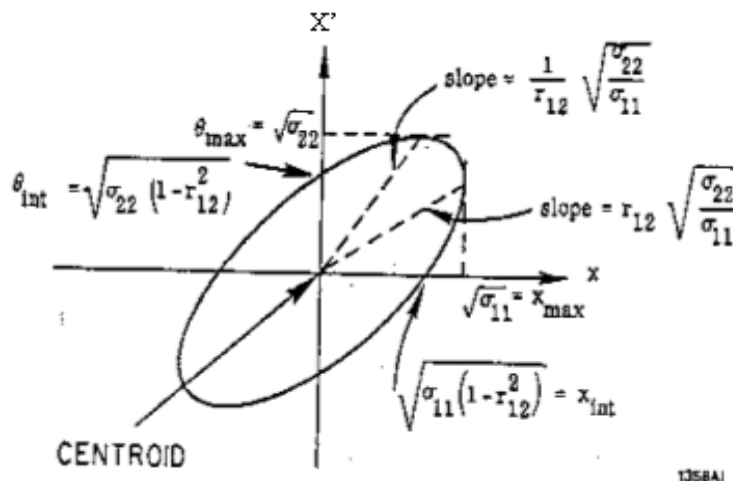
Orientasi dari elips adalah korelasi antara X dan X' , yang besarnya tergantung σ_{ii}

$$r_{12} = r_{21} = \frac{\sigma_{21}}{\sqrt{(\sigma_{11} \sigma_{22})}}$$

berkas partikel atau amplop berkas setelah melalui sistem komponen akselerator, transformasi berkas matriksnya ditunjukkan pada persamaan 1. Kombinasi matriks tersebut dengan persamaan berkas matriks elips, dan dengan menggunakan matriks satuan $R R^{-1} = I$, diperoleh elips baru setelah transformasi menjadi :

$$X(1)^T \sigma(1)^{-1} X(1) = 1 \quad (5)$$

dengan: $\sigma(1) = R \sigma(0) R^T$



Gambar 1. Elips fase pada bidang (X, X') .

Persamaan di atas merupakan matriks sigma pada ujung garis *transport* berkas dihubungkan dengan awal bidang berkas.

Arti dari elemen matriks $\sqrt{\sigma_{ii}}$ sebagai berikut :

$\sigma_{11} = X_{\text{mak}}$ = setengah lebar maksimum amplop berkas pada bidang X .

$\sigma_{22} = X'_{\text{mak}}$ = setengah sudut divergensi amplop berkas pada bidang X .

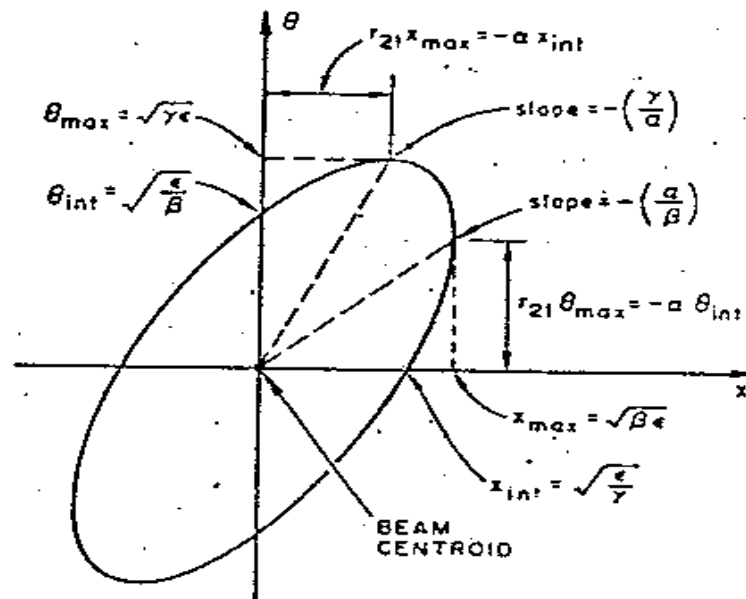
Amplop berkas partikel di dalam *transport* berkas proyeksinya merupakan bentuk elips, dapat juga dituliskan dalam bentuk parameter Twiss α, β, γ

$$\gamma_x x^2 + 2\alpha_x x x' + \beta_x x'^2 = \varepsilon_x \quad (6)$$

masing masing elemen pada persamaan elips di atas dapat dinyatakan dalam bentuk matriks sigma dengan,

$$\gamma_x = \sigma_{22} / \varepsilon_x, \quad \beta_x = \sigma_{11} / \varepsilon_x, \quad \alpha_x = -\sigma_{12} / \varepsilon_x$$

Parameter twiss alfa, beta, dan gamma juga merupakan parameter *courant-syde*, pada Gambar 2 ditunjukkan elip fase pada bidang horisontal dengan twiss parameter yang merupakan penggambaran amplop berkas dalam akselerator.



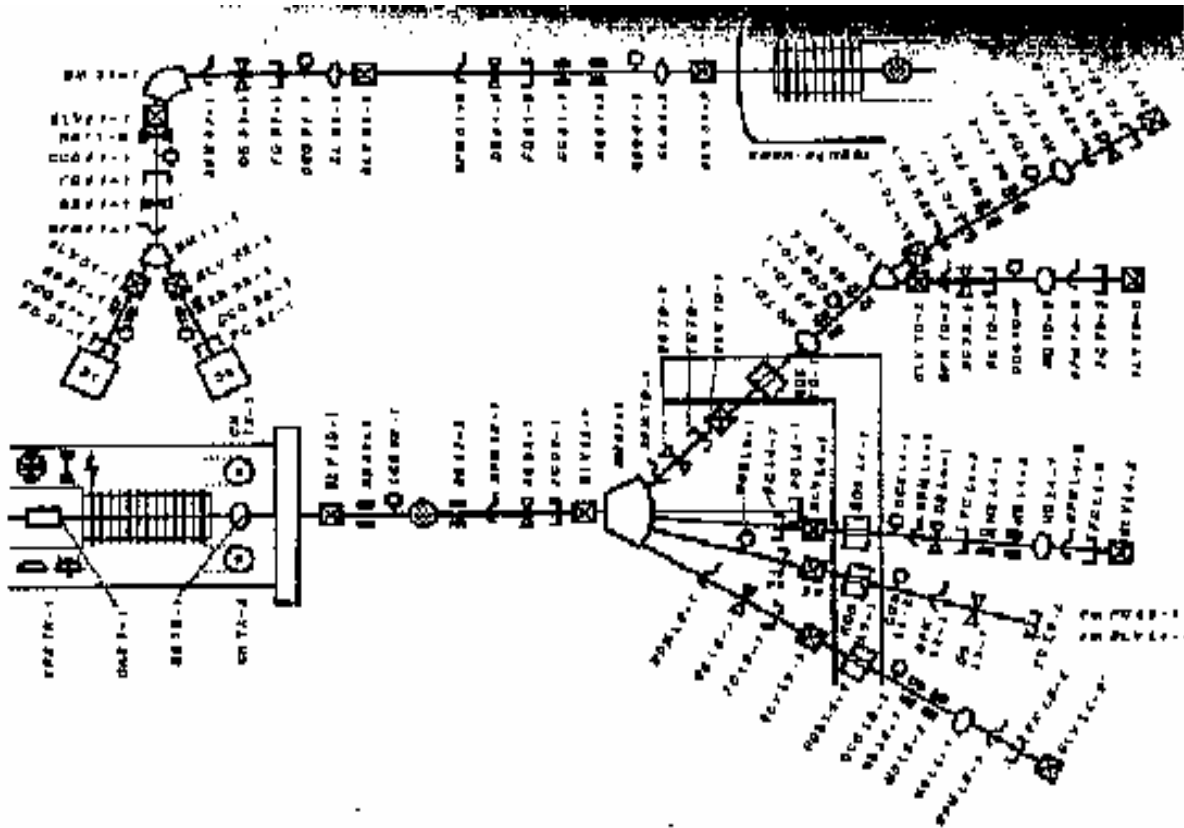
Gambar 2. Fase elip dengan *twiss* parameter.

METODOLOGI

Transportasi berkas ion yang akan disimulasikan dengan program PBO (*particle beam optik*) berdasar tata letak akselerator tandem 1,5 MV seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Sumber ion SNICS dari akselerator tandem menghasilkan ion negatif diekstrak dengan tegangan 15 kV diarahkan dengan lensa einzel ke pembelok magnet 30° sebagai pemilih ion negatif, kemudian difokuskan lagi dengan lensa einzel sebelum dibelokkan pembelok magnet 90° sebagai pengarah ke sistem pemercepat ion negatif.

Keluar dari pembelok magnet, diameter amplop berkas sudah menjadi besar lagi, maka perlu dijaga ruji ke arah horisontal maupun vertikal dengan diberi lensa einzel, sistem pemokus kuadropole elektrostatis, lensa einzel sebelum masuk tabung pemercepat yang diberi tegangan pemercepat 1,5 MV. Pada energi ion > 1,5 MeV ditumbukkan ke *stripper* dari gas nitrogen, sehingga terjadi pelucutan elektron dan terjadi perubahan muatan menjadi ion positif dengan berbagai *charge state*. Ion positif ini dipercepat lagi oleh pemercepat kedua dengan tegangan -1,5 MV, dan dihasilkan energi ion 3 MeV untuk proton tetapi untuk ion dengan *charge state* lebih besar diperoleh energi lebih besar.

Dalam mensimulasi perjalanan berkas digunakan program *fitting* untuk membatasi ruji amplop berkas pada tempat tertentu. Ukuran komponen akselerator mengambil data panjang dari akselerator tandem 5 SDH akselerator peleton, yaitu 1,5 m pemercepat ion negatif, tabung *stripper* dari gas nitrogen sepanjang 0,3 m dan 1,5 m pemercepat ion positif. Akselerator tandem yang akan disimulasi mempunyai terminal dengan jangkauan tegangan antara 0,05 – 1,7 MV. Untuk mengarahkan ke magnet pembelok digunakan lensa einzel EL44-20 dengan apertur 44,5 mm tegangan mencapai 25 kV. Sedangkan untuk mengarahkan ke tabung pemercepat digunakan lensa kuadropol elektrostatis doublet EQT 38-60 dengan panjang elemen 7 cm, apertur 3,8 cm. Semua komponen akselerator di atas yang akan disimulasikan merupakan penawaran dari NEC.

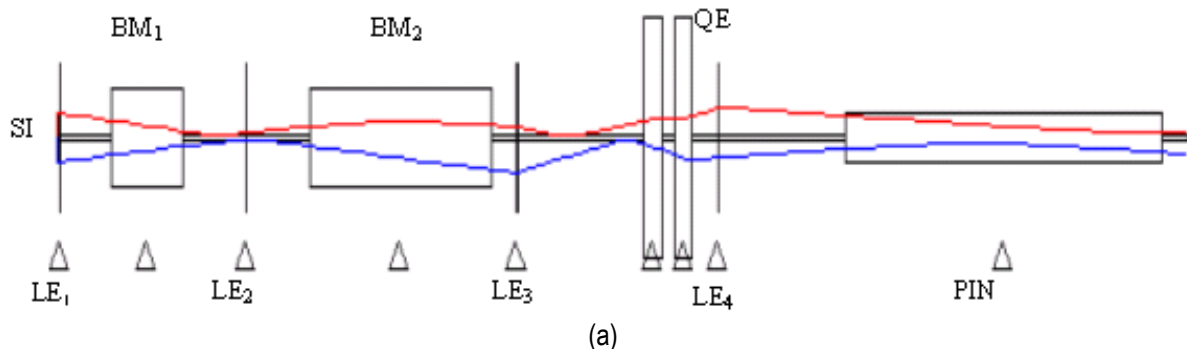


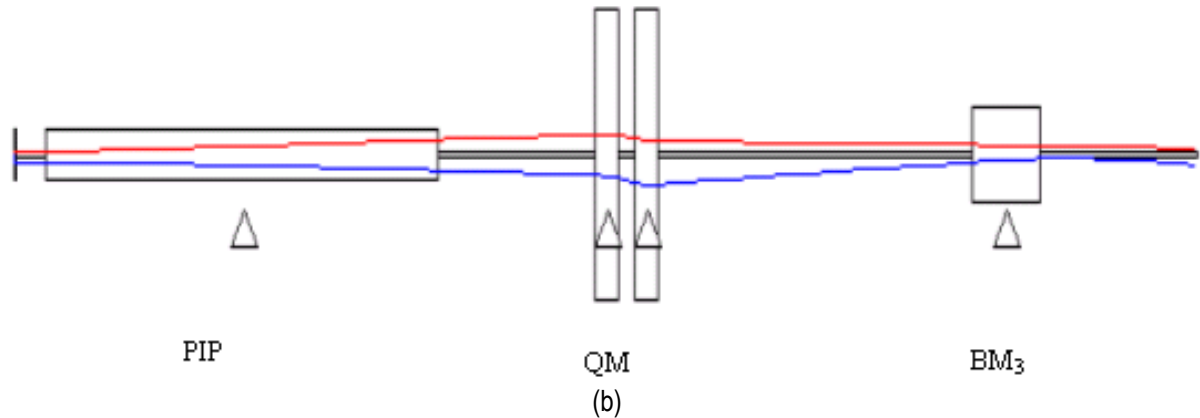
Gambar 3. Tata letak akselerator tandem 1,5 MV.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi akselerator tandem 1,5 MV dengan menggunakan ion hidrogen yang menggunakan program PBO ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada simulasi ini dibagi menjadi dua daerah yaitu pada bagian energi rendah yang dipercepat hanya ion negatif sebelum melewati *stripper*, sedangkan bagian kedua setelah mengalami pelepasan elektron sehingga menjadi ion positif dan dipercepat lagi. Dari gambar di atas terlihat perjalanan amplop berkas mulai dari sumber ion hidrogen melalui peralatan akselerator lensa einsel, pembelok magnit, pemercepat sampai ke target. Secara menyeluruh amplop berkas setelah keluar sumber ion SI langsung difokuskan oleh lensa einsel LE_1 melalui tabung hanyut TH_1 , pembelok magnit BM_1 dan seterusnya sampai ke pemercepat ion negatif PIN. Ruji amplop ke arah horisontal maupun vertikal dari gambar terlihat masih terjaga tidak melebihi diameter dinding tabung hanyut yang besarnya 5 cm.





Gambar 4. Simulasi berkas ion H pada akselerator tandem. (a) pada pemercepat ion negatif, (b) pada pemercepat ion positif.

Diameter berkas ion hidrogen mempunyai ruji ke arah sumbu X dan sumbu Y sebesar 1 cm, dengan emitansi $16,5 \pi \text{ mm mrad}$ sesuai sumber ion jenis SNICS^[4]. Supaya berkas tidak mengalami penyebaran yang menyebabkan menumbuk pada dinding tabung hanyut, maka dipasang program pembatas yaitu mem “fitting” pada pembelok pertama BM_1 , pembelok kedua BM_2 , sebelum masuk kuadropol elektrostatis QE dan sebelum masuk pemercepat PIN. Dengan cara mem-*fitting* secara bergantian, akan diperoleh ukuran amplop berkas tidak melebihi diameter tabung hanyut, dan besarnya panjang fokus maupun medan magnet didepannya dapat diperoleh.

Hasil akhir simulasi sampai tidak ada berkas yang menumbuk dinding adalah: panjang fokus lensa einzel LE_1 setelah keluar sumber ion adalah 70 cm, masuk pembelok BM_1 30° sebagai penyeleksi ion diperoleh jejari kelengkungan 0,533 m dan medan magnet 3,378 kG. Setelah keluar penyeleksi ion negatif difokuskan dengan lensa einzel LE_2 24 cm dan dibelokkan pembelok BM_2 90° lagi untuk mengarahkan berkas ke pemercepat, diperoleh jejari kelengkungan 0,457 m dan medan magnet 3,489 kG. Keluar dari pengarah berkas ion ke pemercepat dilewatkan lensa einzel LE_3 dengan panjang fokus 30 cm untuk difokuskan dengan kuadropol listrik QE, diperoleh hasil simulasi dengan koefisien kuadropol 54,25 dan $-89,51$. Selanjutnya dengan mem-*fitting* pada bagian sebelum masuk pemercepat ion negatif PIN diperoleh panjang fokus lensa einzel LE_4 adalah 26 cm.

Setelah dipercepat dan melewati *stripper*, ion negatif berubah menjadi ion positif dipercepat dengan pemercepat ion positif PIP dan bagian ini dibuat simulasi yang hasilnya terlihat pada Gambar 4b. Ukuran berkas ion diambil dari hasil simulasi pertama. Untuk mendapatkan keluaran berkas ion diameter sekitar 3 mm, dibuat *fitting* pada keluaran kuadropol magnet.

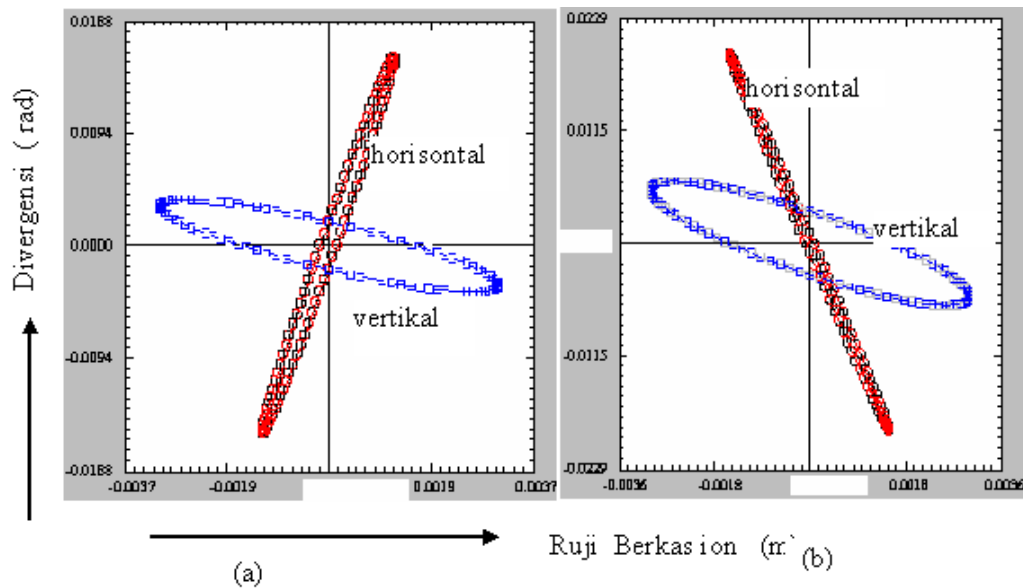
Hasil simulasi diperoleh pemfokus kuadropol magnet QM panjang 0,14 m masing masing dengan medan magnet pada kuadropol 3,2 kG dan $-3,4$ kG. Dan pembelok magnet diperoleh pada sudut 15° , jejari kelengkungan 0,833 m dan medan magnet 3,007 kG.

Pada Lampiran 2 ditunjukkan data-data keadaan ruji ke arah X dan Y, divergensi serta parameter Twiss yang menyatakan arah amplop berkas, dan pada Gambar 5 ditunjukkan amplop berkas setelah keluar pemercepat ion negatif dan keadaan amplop berkas di keluaran akselerator (target).

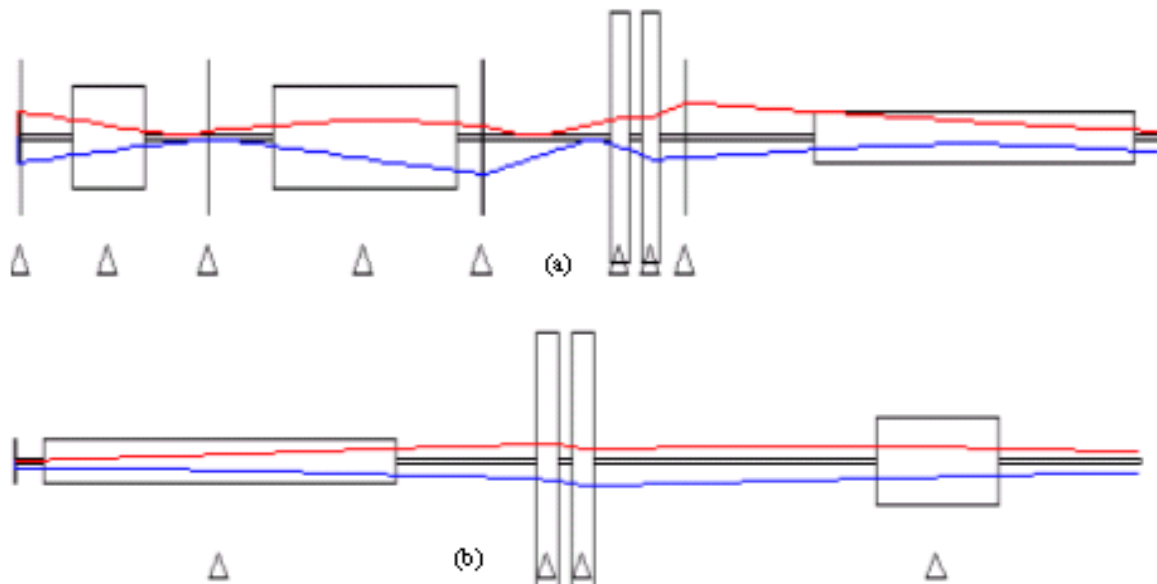
Keadaan amplop berkas keluar dari pemercepat ion negatif (Gambar 5a) adalah ruji ke arah horisontal 0,12 cm, sudut divergensi 15,67 mrad, sedangkan parameter twiss $\alpha_x = -8,0001$, $\beta_x = 0,6173$, untuk ruji ke arah vertikal 0,31 cm, sudut divergensi 3,9 mrad, parameter twiss $\alpha_y = 1,67$, $\beta_y = 1,5471$. Selanjutnya amplop berkas pada keluaran akselerator di target (Gambar 5b) mempunyai ruji ke arah horisontal 0,1120 cm, sudut divergensi 8,54 mrad, sedangkan parameter twiss $\alpha_x = 13,2431$, $\beta_x = 4,2452$, untuk ruji ke arah vertikal 0,3231 cm, sudut divergensi 6,329 mrad, parameter twiss $\alpha_y = 2,4527$, $\beta_y = 1,2960$.

Untuk ion nitrogen, hasil simulasi perjalanan amplop berkas dalam akselerator ditunjukkan pada Gambar 6. Perjalanan amplop berkas ion mulai dari sumber ion sampai ke target dengan ruji ke arah horisontal maupun vertikal tidak melebihi diameter tabung hanyut. Karena ion nitrogen mempunyai massa lebih besar dari pada ion hidrogen, maka terdapat perbedaan besarnya medan magnet yang diperoleh dari hasil simulasi

perjalanan amplop berkas. Pada BM_1 , besarnya medan magnet adalah 6,6831 kG, untuk sudut pembelok yang sama. Sedangkan pada BM_2 dan BM_3 diperoleh besarnya medan magnet masing-masing adalah 34,9674 kG dan 11,2037 kG. Sedangkan besarnya koefisien quadrupole elektrostatik QE pada simulasi energi rendah adalah 19,2163 dan -31,7230, dan untuk quadrupole magnet QM diperoleh besarnya medan magnet 3,133 dan -3,1667 kG. Kalau dibandingkan dengan perjalanan amplop berkas antara ion hidrogen dan ion nitrogen terlihat bahwa, pada pemercepat energi rendah bentuk keluaran dengan ukuran ruji ke arah horizontal maupun vertikal hampir sama (Gambar 4 dan 6) dan besarnya medan magnet pada pembelok maupun pada quadrupol amat berbeda. Sedangkan pada pemercepat energi medium, diperoleh ruji amplop berkas 2,5 cm hampir simetri baik ke arah horizontal maupun vertikal.



Gambar 5. Amplop berkas ion hydrogen.



Gambar 6. Simulasi berkas ion N pada akselerator tandem. a) pada pemercepat ion negatif, b) pada pemercepat ion positif.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi pengendalian amplop berkas partikel akselerator ion energi medium sampai ke target dapat disimpulkan bahwa :

- Simulasi akselerator energi medium yang terjadi dua kali percepatan untuk ion negatif dan ion positif dapat dilakukan dengan cara memisahkan sendiri-sendiri.
- Dengan cara *mem-fitting* diameter berkas pada bagian yang diperlukan, akan diperoleh besaran komponen akselerator .
- Untuk simulasi energi rendah diperlukan empat buah lensa einzel masing-masing dengan titik api 70cm, 24cm, 30 cm dan 26 cm, dua buah pembelok dengan medan magnet 3,378kG dan 3,89 kG, serta kuadropol elektrosatik dengan koefisien kuadropol 54,25 dan -89,51.

DAFTAR PUSTAKA

1. GEORGE GILLESPIE, et.al., Outline of Particle Beam Optics Laboratory Tutorial Version 1.1.1, G.H. Gillespie Associates Inc. 1998.
2. BROWM, KL., et.al., Transport a Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems, CERN Report 73-16, Geneva (1973).
3. WIEDNER C.A, Beam Transport System, Accelerator School, Center for Research and Development of Advanced Technology, 2003.
4. SHIROH KIKUCHI, SUEHIRO TAKEUCHI, A Computer Code "Beam" for the Ion Optics Calculation of the JAERI Accelerator System, JAERI 1987.
5. SIGIT HARIYANTO dkk., Simulasi Alir Berkas Partikel Akselerator J 2.5 Untuk Eksperimen.